

ZUR BEURTEILUNG DER VERZERRUNGEN
BEI GETASTETER SPRACHUEBERTRAGUNG

ABHANDLUNG

zur Erlangung

des Titels eines Doktors der technischen Wissenschaften

der

E I D G E N Ö S S I S C H E N T E C H N I S C H E N
H O C H S C H U L E Z Ü R I C H

vorgelegt von

A L B E R T K Ü N D I G

Dipl. El.-Ing. ETH Zürich

geboren am 19. Februar 1937

von Pfäffikon (Kt.Zürich)

Angenommen auf Antrag von

Prof. H. Weber, Referent

Prof. Dr. E. Baumann, Korreferent

1974

VORWORT

Herrn Prof. H. Weber und Herrn Prof. Dr. E. Baumann danke ich für das grosse Interesse, das sie der nachfolgenden Arbeit entgegenbrachten. Diese ist in der Abteilung Forschung und Entwicklung der Generaldirektion PTT in Bern durchgeführt worden. Für die Möglichkeit, im Rahmen der dortigen Projekte entsprechende Untersuchungen durchführen zu können, danke ich dem Direktor, Herrn W. Klein, sowie Herrn Dr. G. Fontanellaz bestens, ebenso für die vielen wertvollen Anregungen verschiedener Mitarbeiter, insbesondere von Herrn Dr. W. Neu.

Die Firma IBM ermöglichte einen Teil der Untersuchungen, indem sie ihre Spezialeinrichtungen zur digitalen Sprachverarbeitung im Forschungslaboratorium Rüslikon zur Verfügung stellte, wofür ich ebenfalls meinen besten Dank aussprechen möchte. Auch in diesem Labor bin ich zahlreichen Mitarbeitern für interessante Diskussionen und wichtige Hinweise zu grossem Dank verpflichtet.

Schliesslich gilt mein Dank auch allen Mitarbeitern in Bern, die in einer langen Reihe von manchmal mühsamen subjektiven Versuchen teilnahmen.

INHALTSVERZEICHNIS

<u>ZUSAMMENFASSUNG</u>	1
<u>1. EINLEITUNG</u>	4
1.1 Die getastete Uebertragung von Tonsignalen : Einführung und Problemstellung	4
1.1.1 Einführung	4
1.1.2 Problemstellung	7
1.2 Anwendungen	10
1.2.1 Die Entwicklung zu digitalen Fernmeldenetzen	10
1.2.2 Filterprobleme bei Konzentratoren und digitalen Telefonstationen	10
1.2.3 Mehrfachausnutzung von Sprach- kanälen durch Dateneinblendung	12
1.3 Zur Problemstellung und Motivierung für diese Arbeit	13
<u>2. THEORETISCHE GRUNDLAGEN</u>	16
2.1 Abtastung und Rekonstruktion	16
2.1.1 Rekonstruktion durch nichtrekursive Filterung von Impulsreihen	16
2.1.2 Abtasttheorem und Faltungsverzerrungen	18
2.1.3 Der Zusammenhang mit den Interpolations- verfahren der angewandten Mathematik	22
2.1.4 Rekursive Interpolation und z-Transformation	25
2.1.5 Verzerrungen infolge fehlender Abtastwerte	28
2.2 Theoretische Methoden zur Bestimmung optimaler Filter und Rekonstruktionsverfahren	31
2.2.1 Optimale Sende- und Empfangsfilter	31
2.2.2 Optimale Rekonstruktion fehlender Abtastwerte	35
<u>3. SPRACHSIGNALE UND GEHÖR</u>	37
3.1 Sprachsignale und ihre Verformung bei regelmässiger Abtastung	37
3.1.1 Allgemeines	37

3.1.2	Langzeitstatistik	38
3.1.3	Kurzzeitstatistik	41
3.2	Verzerrungen durch Abtastlücken und bei zeitdiskreter Interpolation	46
3.2.1	Langzeitstatistik	46
3.2.2	Kurzzeitstatistik	49
3.3	Folgerungen für das weitere Vorgehen	51
4.	<u>DIE SUBJEKTIVE BEURTEILUNG DER FALTUNGSVERZERRUNGEN</u>	52
4.1	Versuchsmethoden	52
4.1.1	Die Versuchskonzeption	52
4.1.2	Die subjektive Beurteilung der Uebertragungsqualität	57
4.2	Schmalbandige Verzerrungen	59
4.2.1	Die experimentelle Bestimmung der Störschwellen	59
4.2.2	Der Einfluss auf die Verständlichkeit	66
4.2.3	Die Abhängigkeit der Ergebnisse von den Versuchsgegebenheiten	69
4.3	Breitbandige Verzerrungen	70
4.3.1	Bestimmung der Ueberlagerungsgesetze	70
4.3.2	Grundlagen für die Auswahl verzerrungsfreier Filter	74
4.3.3	Qualitative Beschreibung der Verzerrungen	76
4.4	Optimale Sende- und Empfangsfilter	76
4.4.1	Auswahl der günstigsten Kombinationen in einem Eliminationsverfahren	76
4.4.2	Verständlichkeit bei optimalen Filterkombinationen	77
4.4.3	Vergleich der Uebertragungsqualität bei verschiedenen Abtastfrequenzen	81
4.5	Zusammenfassung und Auswertung der Ergebnisse	82
4.5.1	Empfohlene Filtercharakteristiken	82
4.5.2	Aufwandabschätzungen für die Filter	84
5.	<u>VERZERRUNGEN BEI ZEITDISKRETER INTERPOLATION</u>	86
5.1	Versuchskonzeption	86
5.2	Versuchsergebnisse	87

<u>6. SCHLUSSFOLGERUNGEN</u>	90
<u>ANHANG A : ZUR DURCHFÜHRUNG DER VERSUCHE</u>	91
A.1 Sprachmaterial	91
A.2 Simulationsmethoden	91
A.3 Analysemethoden	95
A.4 Subjektive Versuche	95
A.4.1 Paarweise Vergleiche (Präferenzmethoden)	96
A.4.2 Notenbewertung	98
A.4.3 Reintests	99
<u>ANHANG B : KATALOG DER VERSUCHSFILTER</u>	102
B.1 Klassifizierungsmethode	102
B.2 Filterstruktur	102
B.3 Filtersynthese	103
B.4 Filterverzeichnis	106
<u>ANHANG C : LITERATURHINWEISE</u>	120

ZUSAMMENFASSUNG

Die Sprachübertragung in integrierten digitalen Nachrichtennetzen erfolgt nach dem Prinzip der Abtastung und Rekonstruktion, wobei sowohl sende- wie empfangsseitig eine verzerrungsfreie Wiedergabe durch geeignete Filter sichergestellt werden muss. Es zeigt sich durch Untersuchung der langzeitlichen im Vergleich mit den kurzzeitlichen statistischen Eigenschaften von Sprachsignalen, dass die Dimensionierung der Filter nur aufgrund einer subjektiven Beurteilung der Verzerrungen richtig durchgeführt werden kann. Die entsprechende Optimierung der Filter erfolgt in einem zweistufigen Verfahren. Zunächst wird gezeigt, dass ein beliebiges Filter durch Superposition \cos^2 -förmiger Elementarfilter konstruiert werden kann, und dass dessen Verzerrungseigenschaften in einfacher Weise von der Verzerrungswirkung der zugrunde liegenden Elementarfilter abhängen. Mit dieser Basis können Gruppen von verzerrungsfreien Filtern ausgeschieden werden, aus denen in einem zweiten Schritt durch paarweise Vergleiche die besten Kombinationen von Sende- und Empfangsfiltern hervorgehen.

Die Versuche zeigen, dass die subjektiv optimierten Filterkombinationen Frequenzgänge aufweisen, die wesentlich von den theoretisch idealen Lösungen abweichen. Insbesondere erlauben sie einfache Filterrealisierungen bei subjektiv besserer Übertragungsqualität gegenüber den gemäss Abtasttheorem erforderlichen idealen Tiefpässen. Die Untersuchungen schliessen einen Vergleich der Übertragungsqualität bei verschiedenen Abtastfrequenzen ein.

Im Zuge der theoretischen Ableitungen wird der Zusammenhang zwischen der kontinuierlichen Interpolation von Abtastwerten durch Filter und der zeitdiskreten Rekonstruktion von Abtastlücken hergeleitet. Diese letztere lässt sich zur Gewinnung zusätzlicher Datenkanäle aus digitalen Telefon-

kanälen verwenden. Mittels subjektiver Beurteilungsverfahren werden auch für diesen Fall die Störschwellen bestimmt, wobei sich ergibt, dass die erreichbaren Datenraten in der gleichen Größenordnung wie bei andern Methoden (zum Beispiel "bit stealing") liegen.

Die subjektive Beurteilung erfolgt sowohl hinsichtlich Natürlichkeit der Wiedergabe (mit Hilfe von Präferenztests) wie auch bezüglich Verständlichkeit (mit Hilfe von Reimtests). Es zeigt sich, dass die untersuchten Verzerrungen weitgehend nur Einfluss auf die Wiedergabequalität und nicht auf die Verständlichkeit besitzen.

S U M M A R Y

In integrated digital communication systems, speech signals must be filtered both before sampling and following reconstruction to prevent aliasing distortion. A comparison of the time dependent and longtime statistical properties of speech signals shows that the design of pre- and postfilters should be based on a subjective evaluation of the distortion phenomena. The corresponding optimization is carried out in two steps. First, it is shown that an arbitrary filter may be decomposed into elementary filters with \cos^2 -shape. The subjective performance of that filter is rather simply related to that of the elementary filters by superposition principles, so that measurements on the elementary filters form the basis for the choice of distortionless characteristics. In a second step, the best combinations of sending and receiving filters are found with pairwise comparisons.

The results of the subjective evaluations depart significantly from the theoretically optimum ideal low pass filters. Simple filter realizations result in a statistically significant improvement in transmission quality for a range of different sampling rates.

The time discrete reconstruction of missing samples, which is closely related in theory to continuous interpolation by the receiving filter, may be used to extract data subchannels in PCM telephone transmission. Subjective tests show that such "sample stealing" methods yield data rates similar to those obtained by "bit stealing".

The subjective evaluation comprised both naturalness (by preference methods) and intelligibility (by rhyme tests). Surprisingly, speech with intolerable aliasing distortion does not show a statistically significant degradation of intelligibility.

1. EINLEITUNG

1.1 DIE GETASTETE UEBERTRAGUNG VON TONSIGNALEN: EINFUEHRUNG UND PROBLEMSTELLUNG

1.1.1 Einführung

Die in der Nachrichtentechnik wichtige Klasse der Pulsmodulationsverfahren beruht auf Prinzipien, welche in der Mathematik seit langem bekannt sind und dort vor allem bei den numerischen Rechenverfahren ihre Anwendung finden. Es geht dabei um die Ersetzung kontinuierlicher Funktionen durch diskret verteilte Stützwerte einerseits, und die Rekonstruktion oder Interpolation der Funktionen aus diesen Stützwerten andererseits.

In der Nachrichtentechnik handelt es sich - soweit es uns im Rahmen dieser Arbeit interessiert - um Zeitfunktionen (Strom, Spannung, Druck usw. als Funktion der Zeit), und im Besonderen um die der menschlichen Sprache entsprechenden akustischen oder elektrischen Signale. Den Vorgang der Bestimmung von Stützwerten nennt man Abtastung, die Stützwerte selbst Abtastwerte. Die Pulsmodulationsverfahren beschränken sich auf eine Uebertragung der Abtastwerte anstelle der ursprünglichen zeitkontinuierlichen Signalfunktionen und überlassen es dem Empfänger, ein möglichst genaues Abbild des Originals aus den Stützwerten zu rekonstruieren. Die Interpolationsverfahren der Mathematik und die Pulsmodulationstechnik haben naturgemäss gewisse grundlegende Merkmale gemeinsam. Es sind zwei Fragen, die in diesem Zusammenhang vor allem beschäftigen:

- Wie gross ist die Anzahl und welcher Art die Anordnung der Stützstellen, damit theoretisch bei gegebener Funktionsklasse eine möglichst genaue Rekonstruktion aus den Stützwerten möglich ist ?
- Mit welchen Fehlern ist bei nicht ideal verteilten Stützstellen und bei Rekonstruktionsverfahren, die von den theoretisch optimalen abweichen, zu rechnen ?

Die folgende tabellarische Gegenüberstellung (Tabelle 1.1) möge dies anhand von Beispielen noch besser beleuchten, und zugleich auf das eigentliche Thema dieser Arbeit überleiten.

Die ersten Versuche, Pulsmodulationsverfahren in der Nachrichtentechnik einzusetzen, erfolgten bereits sehr frühzeitig /1/. Das Hauptmotiv war in einer besseren Ausnutzung der Uebertragungswege durch eine zeitliche Verschachtelung der Abtastwerte verschiedener Signale zu suchen (Zeitmultiplextechnik). Bald wurde erkannt, dass die Zahl der Abtastwerte pro Zeiteinheit, die für eine verzerrungsfreie Wiedergabe notwendig ist, in direktem Zusammenhang mit der Aenderungsgeschwindigkeit der Signale steht. Mit der Formulierung des Abtasttheorems gelang dann Shannon eine exakte Beschreibung der theoretischen Zusammenhänge unter idealisierten Voraussetzungen /2/.

Unter den Gegebenheiten der heutigen Technologie besitzen die digitalen Modulationsmethoden wie Pulscode- und Deltamodulation in der Nachrichtentechnik besondere Vorzüge. Diese setzen ihrer Natur nach eine getastete Uebertragung voraus. In zunehmendem Masse wird heute auch in der Sprachforschung die digitale Signal-darstellung und -verarbeitung verwendet¹⁾, die ihrerseits eine Abtastung der Analogsignale und gegebenenfalls eine Rekonstruktion nach Durchlaufen des Rechenprozesses erfordern /3,4/. Die Bedeutung digitaler Methoden in der Sprachforschung sowie die Aussicht, dass in Zukunft die Umwandlung von Sprach- und Bildsignalen in digitale Form direkt beim Teilnehmer erfolgen könnte, hat Untersuchungen über die Grundlagen der Abtastung und Rekonstruktion erneut aktualisiert. Der Grund dafür liegt, soweit es das zweite Gebiet betrifft, bei der sehr grossen Zahl der entsprechenden Modulations- und Demodulationseinrichtungen (z.B. Abtastschalter und Filter bei jedem Teilnehmer), mithin bei wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Darauf soll in Abschnitt 1.2 mit den Anwendungen noch näher eingegangen werden.

1) Der Begriff "Sprache" wird hier mit dem Sinn "menschliche Stimme" verwendet.

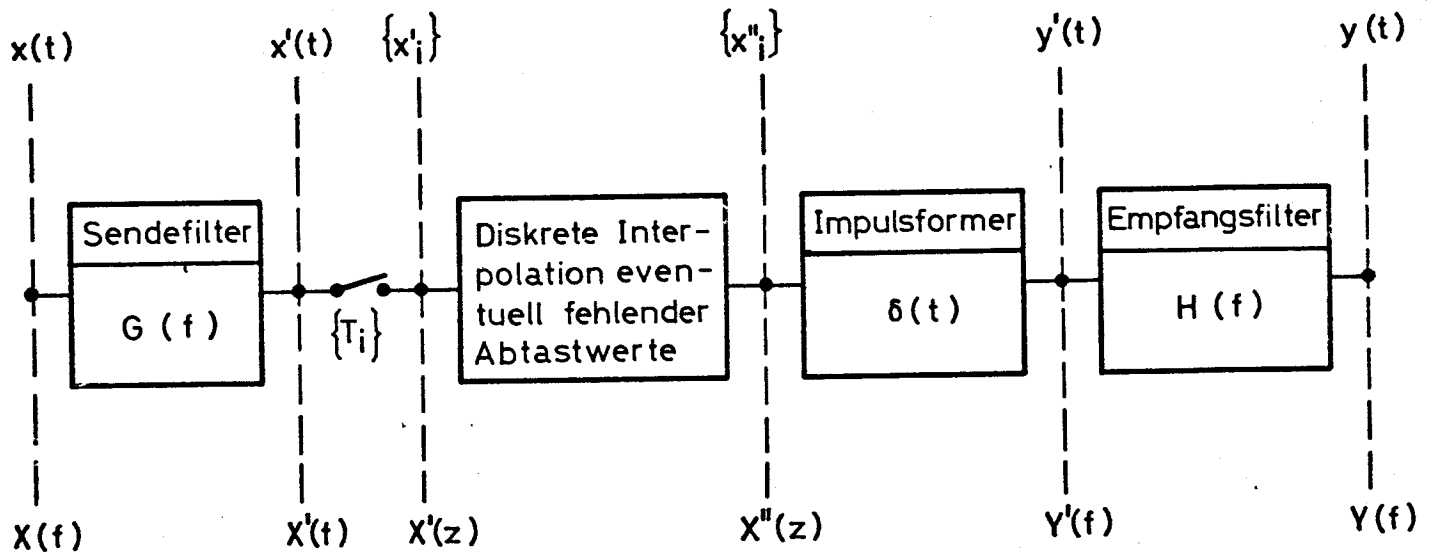
Gebiet	Beschreibung des Problems	Funktionsklasse	Rekonstruktionsmethode	Der Rekonstruktion zugrundeliegendes Gesetz	Bemerkungen
Analytische Geometrie	Ersetzen einer Kreislinie durch diskrete Parameter a, b, r : $(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2$	"Kreis"	mit Lineal und Zirkel	eine Kreislinie ist durch 3 Parameter eindeutig festgelegt	Interpolation exakt, Kurve in ihrer Gesamtheit rekonstruierbar
Mathematische Tabellenwerke	Herauslesen von Zwischenwerten aus mathematischen Tafeln	beliebig, sofern Inkrement gegenüber Funktionsänderung genügend klein	lineare Interpolation: Ersetzen der Funktion in lokalem Bereich durch Gerade	eine lokale Näherungsgerade wird durch zwei Punkte vollständig bestimmt	Interpolation im allgemeinen nur angenähert richtig; Näherung nur in beschränktem Bereich genügend genau.
Pulsmodulationstechnik	Übertragung einer Zeitfunktion mit diskret verteilten Abtastwerten anstelle des Analogsignals	"bandbegrenzt"	mit Interpolationsfilter	Abtasttheorem	Interpolation theoretisch exakt möglich; sequentieller Vorgang

Tabelle 1.1

1.1.2 Problemstellung

Anhand von Fig. 1.1 soll nun das in dieser Arbeit behandelte Problem in seinen Grundzügen erläutert werden.

Zeitfunktionen / Zeitreihen



Fouriertransformierte / z - Transformierte

Fig.1.1 Modell eines getasteten Übertragungssystems

Das zu übertragende Signal $x(t)$ wird zunächst mit Hilfe des Filters $G(f)$ so vorverzerrt, dass die nachfolgende Abtastung des Signals $x'(t)$ in den Zeitpunkten T_i eine möglichst exakte Wiedergabe im Empfänger zulässt. Es handelt sich dabei im Sinne des Abtasttheorems um eine Beschränkung der Energie bei Frequenzen, die die halbe Abtastfrequenz übersteigen. Die Uebertragung der Abtastwerte x'_i erfolgt in der Praxis mit den verschiedensten Methoden, die man den Eigenschaften des Uebertragungsweges anpasst. Für unsere Untersuchungen wollen wir annehmen, dass es sich um eine ideale Uebertragung handelt, und zwar in dem Sinne, dass dem Empfänger die unverfälschte Folge x'_i zur Verfügung steht ²⁾. Es soll auch eine ideale, das heisst genügend feine

2) Siehe folgende Seite

Amplitudenquantisierung im Falle der digitalen Modulationsmethoden angenommen werden. Diese beiden Voraussetzungen sind sowohl in zukünftigen digitalen Nachrichtennetzen, als auch bei der Sprachverarbeitung auf Rechnern praktisch immer erfüllt.

Für die Rekonstruktion können wir ein verhältnismässig einfaches Modell zugrundelegen, das sowohl mit den in der Nachrichtentechnik üblichen Demodulationsmethoden, als auch mit den Interpolationsverfahren der angewandten Mathematik zur Deckung gebracht werden kann (siehe Abschnitte 2 und 5). Es handelt sich dabei um eine Rekonstruktion durch Ueberlagerung von Elementarsignalen oder -funktionen $h(t)$, die man mit den Abtastwerten x_i' gewichtet und der Folge T_i entsprechend zeitlich anordnet:

$$y(t) = \sum x_i' h(t - T_i)$$

Die Elementarfunktion $h(t)$ identifiziert man

- in der Nachrichtentechnik: Mit der Impulsantwort eines Rekonstruktionsfilters $H(f)$ ³⁾.
- in der angewandten Mathematik: Mit der Interpolationsfunktion (z.B. Gerade, Polynomfunktion usw. durch die Stützwerte).

2) Abgesehen von dem in den Abschnitten 1.2 und 5 behandelten speziellen Falle der Uebertragungsfehler, die man auf eine unregelmässige sendeseitige Abtastung zurückführen und - sofern fehlererkennende Codes verwendet werden - mittels Interpolation im Empfänger ausgleichen kann.

3) Man kann leicht zeigen /5/, dass die in der praktischen Nachrichtentechnik übliche Rekonstruktion durch Filterung einer Reihe von modulierten Pulsen $x_i' p(t - T_i)$ mit der Einführung eines fiktiven Filters $H(f)$ ebenfalls durch die hier verwendete Methode erfasst wird: Das in diesem Fall notwendige Empfangsfilter ist $H'(f) = H(f)/P(f)$, wobei $P(f) = FT\{p(t)\}$.
FT = Fouriertransformation.

Im weiteren wollen wir aus praktischen Gründen das Hauptgewicht auf Verfahren legen, bei denen - mindestens empfangsseitig - die Abtastzeitpunkte in regelmässigen Abständen $T_i = i \cdot T$ verteilt sind. Es soll aber durchaus mit eingeschlossen werden, dass nicht zu allen Abtastzeitpunkten vom Sender erzeugte Abtastwerte vorliegen. In diesem Fall werden durch eine erste Rekonstruktionsstufe die fehlenden aus den vorhandenen Abtastwerten interpoliert, worauf die komplettierte Folge dem eigentlichen Rekonstruktionsfilter zugeführt wird.

Wir sind nun in der Lage, die Problemstellung etwas genauer zu formulieren:

1) Gesucht sind jene Filtercharakteristiken $G(f)$ und $H(f)$, die bei regelmässiger Abtastung eines Sprachsignals mit gegebener Abtastfrequenz $f_s = 1/T$

a) eine möglichst gute Uebertragungsqualität ergeben, oder

b) bei vorgeschriebenen Mindestanforderungen an die Uebertragungsqualität möglichst einfache Filterkonstruktionen erlauben.

Die uns dabei interessierenden Verzerrungen sollen als Faltungsverzerrungen bezeichnet werden (siehe Kapitel 2).

2) Es soll das verwandte Problem der Regenerierung isolierter Abtastwerte auf Grund des benachbarten Signalverlaufes (Zeitdiskrete Interpolation) untersucht werden.

Abschliessend soll noch darauf aufmerksam gemacht werden, dass praktisch alle im folgenden gemachten Ueberlegungen statt auf kontinuierliche Signale $x(t)$ und $y(t)$ auch auf Abtastwertfolgen $\{x_i\}$ und $\{y_i\}$ anwendbar sind. An die Stelle der Analogfilter $G(f)$ und $H(f)$ treten dann Laufzeitfilter, die am besten durch ihre Uebertragungsfunktionen $G(z)$ und $H(z)$ im z -Bereich ⁴⁾ charakterisiert werden. Von dieser Aequivalenz soll frei Gebrauch gemacht werden, vor allem auch bei den verschiedenen praktischen Versuchen selbst.

4) $z = e^{+j\omega T}$

1.2 ANWENDUNGEN

In diesem Abschnitt wird auf die praktische Bedeutung der Pulsmodulationsverfahren hingewiesen, indem einige Anwendungen kurz beschrieben werden, auf die die nachfolgenden Untersuchungen anwendbar sind. Es geht auch darum, die bereits erwähnte wirtschaftliche Bedeutung noch besser aufzuzeigen.

1.2.1 Die Entwicklung zu digitalen Fernmeldenetzen

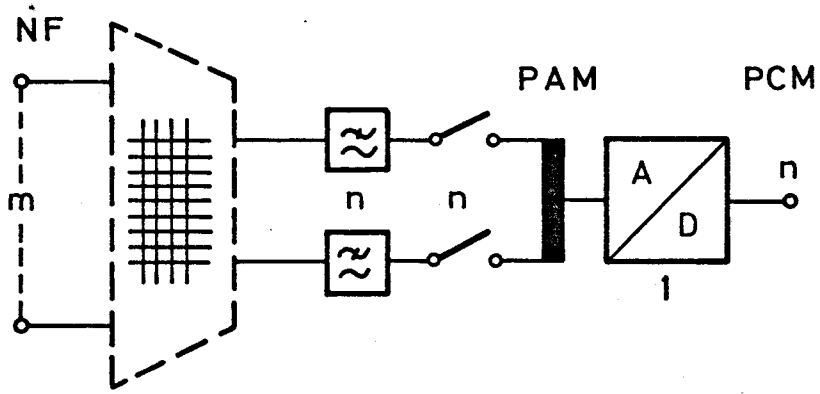
Die Gründe für eine Entwicklung zu integrierten digitalen Fernmeldenetzen hin sind heute wohlbekannt und entsprechend gut dokumentiert. Eine ausführliche Bibliographie findet sich in /5/, sodass wir uns auf eine Zusammenfassung beschränken können. Im wesentlichen sind es folgende Vorteile, die für die Digitaltechnik sprechen:

- Bessere Ausnutzung bestehender Uebertragungswege
- Unkritische, preisgünstige Schaltungstechnik und damit Eröffnung des Weges zur vollelektronischen Vermittlung
- Möglichkeit, Signale verschiedenartigen Ursprunges (Sprache, Bild, Daten) in einheitlicher Form bis zu den Teilnehmern zu übermitteln.

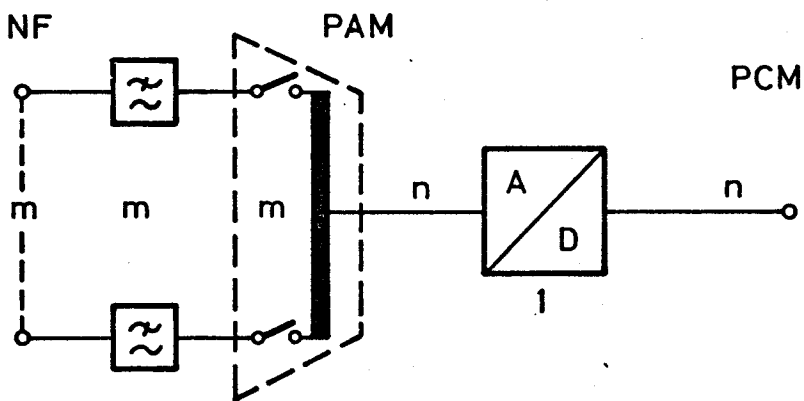
Es ist durchaus möglich, dass die heutige Telephonstation durch ein Mehrzweckgerät abgelöst wird, das nicht nur die Sprach- und Bildübertragung, sondern auch den Anschluss von Zusatzeinrichtungen (Schreiber, Faksimilegeräte, Rechner usw.) gestattet. Neben dem Problem einfacher Sende- und Empfangsfilter ergeben sich daher noch weitere uns im Rahmen dieser Arbeit interessierende Fragen, wie zum Beispiel der gleichzeitigen Datenübertragung in einem Sprachkanal.

1.2.2 Filterprobleme bei Konzentratoren und digitalen Telephonstationen

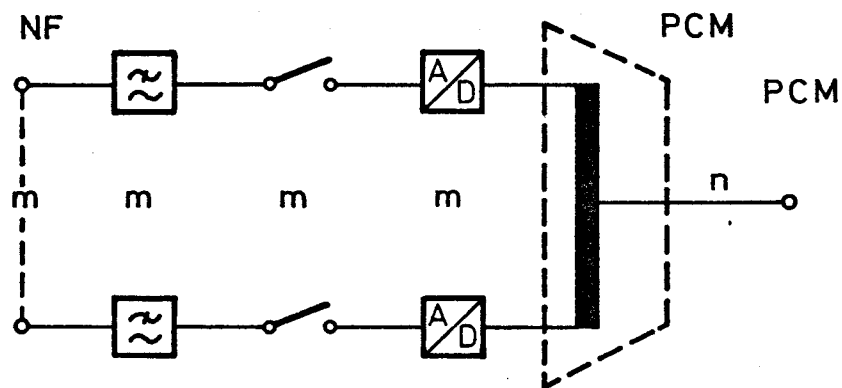
Es ist anzunehmen, dass im Zuge der Entwicklung die Codierung und Decodierung immer näher zu den Teilnehmern vorrücken wird. Mögliche Stufen in dieser Entwicklung wurden bereits mehrfach beschrieben /5-9/ und seien in Fig.1.2 zusammengefasst. Es geht



Elektromechanischer
Konzentrator



PAM - Konzentrator



Digitaler
Konzentrator

Kanalzahlen: $m > n$



Tiefpass

Abtastschalter

PAM / PCM - Sammelschiene

Analog / Digital - Wandler

Figur 1.2 Der Teilnehmeranschluss bei digitalen Netzen

daraus klar hervor, dass die Komplexität von Abtastung, Filterung und Codierung/Decodierung in zunehmendem Masse die Wirtschaftlichkeit beeinflusst. Zusätzlich haben wir in /9/ bereits gezeigt, dass mit dem Näherrücken der Abtastung zum Teilnehmer die Filtercharakteristiken weitgehend nur noch durch die Vermeidung möglicher Verzerrungen und nicht mehr durch die Nebenfunktion der Unterdrückung externer Störungen bestimmt werden.

1.2.3 Mehrfachausnutzung von Sprachkanälen durch Dateneinblendung

Die bereits erwähnten Mehrzweckterminale würden an sich eine gleichzeitige Sprach- und Datenübertragung gestatten. Bei vielen Anwendungen - zum Beispiel bei der Uebermittlung von Bildänderungen - ist die effektive Datenrate gegenüber der für die digitale Sprachübertragung notwendigen Geschwindigkeit recht klein. Es sollte daher möglich sein, unter zeitweiliger Inkaufnahme einer verminderten Sprachübertragungsqualität, einzelne Zeichen für zusätzliche langsame Datenkanäle zu verwenden. Bei der PCM-Uebertragung drängen sich namentlich zwei Methoden auf:

- a) Sporadische Verminderung der Anzahl Zeichen pro Abtastwert (englisch "bit stealing").
 - b) Gelegentliche Verwendung einer ganzen Zeichengruppe anstelle eines Abtastwertes, mit Rekonstruktion des fehlenden Wertes aus dem benachbarten Signalverlauf ⁵⁾.
- 5) Auf das Problem der Synchronisierung soll hier nicht näher eingetreten werden. Es sind zwei Verfahren denkbar:
- 1) Einführung einer Ueberrahmenstruktur mit regelmässiger Dateneinblendung;
 - 2) Reduzierung des für die Sprache verwendeten Codevorrates um eine Anzahl Zeichen, die für Daten reserviert bleiben und damit eindeutig erkannt werden können.

Nachdem die Methode a) bereits untersucht und angewendet wurde /10/, soll die Aufmerksamkeit hier dem zweiten Verfahren zugewandt werden. (In Anlehnung an das "bit stealing" müsste man hier von "sample stealing" sprechen). Die Methode soll im folgenden als diskrete Interpolation bezeichnet werden.

1.3 ZUR PROBLEMSTELLUNG UND MOTIVIERUNG FÜR DIESE ARBEIT

Selbstverständlich ist in der Vergangenheit dem Problem der Dimensionierung von Tiefpassfiltern in getasteten Systemen und Fragen der Abtastung und Rekonstruktion allgemein viel Aufmerksamkeit geschenkt worden. Es gibt aber zwei Gründe, die für eine neuerliche Untersuchung mit veränderten Gesichtspunkten sprechen.

Zum ersten müssen wir auf die bisherigen theoretischen Arbeiten Bezug nehmen. Diese sind ausserordentlich umfangreich, sodass wir hier lediglich auf /1,14/ hinweisen wollen. Allen diesen Arbeiten ist aber gemeinsam, dass das zu übertragende Signal in erster Linie durch sein Langzeitspektrum charakterisiert wird. Dabei wird man notwendigerweise nicht nur eine Mittelung über lange Zeit, sondern auch eine solche über eine Vielzahl von Sprechern zugrundelegen, mit der Absicht, die angestrebte Optimierung möglichst vielen Anwendungsfällen gerecht werden zu lassen. Für das gegebene Spektrum werden dann sowohl die Veränderung durch die Filter (lineare Verzerrungen) als auch die durch den Abtastvorgang hervorgerufenen Störprodukte (nicht-lineare Verzerrungen) zusammen als Fehlersignal betrachtet, und man versucht, durch eine geeignete Wahl der Filtercharakteristiken die Verzerrungsleistung, die man als mittleren quadratischen Fehler berechnet, zu minimalisieren. Dazu müssen jedoch ernsthafte Bedenken angemeldet werden:

- Es ist allgemein anerkannt, dass die Störempfindung des Gehörs nicht notwendigerweise proportional mit dem mittleren quadratischen Fehler verknüpft ist. Es besteht sogar Grund zur Annahme, dass in gewissen Fällen die Uebertragungsqualität oder die Verständlichkeit durch Verzerrungen scheinbar erhöht wird /8,15/.